数理解析研究所講究録
195 巻 1973 年 77-86

Kesten の Nonliner Stochastic Growth Models

京産大 理 森 隆一

Kesten の一連の論文

[1] H. Kesten, "Some non-linear stochastic growth models." Bull. A.M.S. 77 (1971) 492～511

[2] ——— , "Quadratic transformations," I, II. Adv. Appl. Prob. 2 (1970), 1～82, 179～228

[3] ——— . "Limit theorems for stochastic growth models." I, II. Adv. Appl. Prob. 4 (1972) 193～232, ?.

[4] — and P. Stigum "Balanced growth under uncertainity in decomposable economics" preprint

の紹介を行う。 なお [1] は Kesten 自身がまとめた要約である。

1. Multitype Galton-Watson process について

Generating function $f_i(s) = \sum_r p_i(r) s_1^{r_1} \cdots s_d^{r_d}$

が与えられたとする。 但し d は positive integer. $r = (r_1, \cdots, r_d)$

は nonnegative integer の d-vector, $S=(S_1,\cdots,S_d)$ は $|S_i|\leq 1$ なる complex d-vector. このとき次の条件をみたす $(\mathbb{Z}_+)^d$-valued Markov chain X_n, ($\mathbb{Z}_+$ は non-negative integer の全体), を Multitype Galton-Watson process という.

$$(1) \qquad E(S^{X_{n+1}}/X_0,\cdots X_n)=\prod_{i=1}^{d} f_i(S)^{X_n(i)}$$

$X_n(i)$ は X_n の i-成分.

(1) により各粒子は互いに独立に粒子を生み, この分布は粒子の type によってきまる.

$$0<\ m_{ij}\equiv\frac{\partial f_i(S)}{\partial S_j}\Big|_{S=(1,\cdots,1)}<\infty,\ \frac{\partial^2 f_i(S)}{\partial S_j\partial S_k}\Big|_{S=(1,\cdots,1)}<\infty$$

と仮定し $M\equiv(m_{ij})$ なる matrix とすれば, まず Perron-Frobenius の定理により, M は絶対値最大, 正かつ simple な固有値 ρ をもつ, 対応する右(左)固有 vector u (v) は strictly positive で $u\cdot v=1$ と仮定すれば,

$$\left|\frac{M^n(i,j)}{\rho^n}-u(i)\,v(j)\right|\leq K\lambda^n \qquad 0\leq\lambda<1$$

がなりたつ. 更に,

$\rho\leq 1$ ならば $X_n=0$ eventually ($\exists N$, $X_n=0$ for $n\geq N$)

$\rho>1$ ならば $\displaystyle\lim_{n\to\infty}\frac{X_n}{\rho^n}=w\cdot v$ a.e.

w は1次元確率変数で.

$$1 > \mathrm{Prob}\{W = 0\} = \mathrm{Prob}\{X_n = 0 \text{ eventually}\}.$$

2. Fisher-Wright-Haldane の model.

G-W-process を含むある process の class に対して同様の極限定理を示すことが目標であるが、この定理に移るまえに基本的な例を示すことにする。1-step の transition probability が次で与えられる $(\mathbb{Z}_+)^d$-valued Markov chin を考える。 $Z_n = Z$ の場合にまず $[\frac{|Z|}{2}]$ 個の couple をつくる。(但し $|Z| \equiv \sum_{i=1}^{d} Z(d)$, $Z = (Z(1), \cdots, Z(d))$.) このつくり方は random drawing without replacement により $2r-1$ 番目と $2r$ 番目のものが1つの couple をつくる。最初が j-type あとが k-type のものを (j,k)-couple と呼ぶ。次に各 couple は互いに独立に $n+1$-世代の粒子を生む。この場合の分布は couple の type によって決まるものとする。更に $f(i|j,k)$, $\sigma^2(i|j,k)$ を夫々 (j,k)-couple より生まれる i-type の粒子の平均個数及び分散とし共に有限と仮定する。

この model に対して次のことがなりたつ。$E_n(\cdot\ )$ は $E(\cdot\ |Z_0, \cdots, Z_n)$ 又は $E(\cdot\ |X_0, \cdots, X_n)$ と略したものとすると、

$$(2) \quad E_n(Z_{n+1}(i)) = \sum_{j,k} f(i|j,k)\left[\frac{|Z_n|}{2}\right]\frac{Z_n(j)}{|Z_n|}\,\frac{Z_n(k)-\delta(j,k)}{|Z_n|-1}$$

更に Z_{n+1} の条件付分散は $|Z_n|$ の order になる。

一方 G.-W. process では.

(3) $$E_n(X_{n+1}(i)) = \sum_{j=1}^{d} m_{ji} X_n(j)$$

となり.(2)と(3)を比べれば(2)の右辺は Z_n の二次式,(3)の右辺は X_n の一次式である. ここで次の operator を考える.

(4) $$Tz(i) = \frac{\sum_{j,k=1}^{d} z(j)z(k)f(i|j,k)}{\sum_{j,k,l=1}^{d} z(j)z(k)f(l|j,k)} \ : A \to A.$$

$$A = \{z=(z(i)) : z(i)\ge 0,\ \sum z(i)=1\}$$

(5) $$\tau(Z) \equiv \frac{|Z_n|}{2}\sum_{j,k,l}\tilde{Z}_n(j)\,\tilde{Z}_n(k)\,f(l|j,k) \ : (\mathbb{R}_+)^d \to \mathbb{R}_+$$

$0 \ne Z \in (\mathbb{R}_+)^d$ に対し $\tilde{Z} \equiv \dfrac{Z}{|Z|} \in A.$

これを用いれば,

(6) $$E_n Z_{n+1}(i) = \tau(Z_n)\,T\tilde{Z}_n + Y_n, \quad |Y_n| \le K$$

とかくことができる. 平均個数の変化のうち T は割合 τ は絶対値の変化を表わすと考えられる. 収束定理の deterministic な部分, G.W. process における Perron-Frobenius の定理に相当する部分を調べるのが次の問題となる。即ち T は A 上の連続作用素であるから不動点は存在するが, 更にこの不動点は unique か, また almost contraction (i.e. $\exists K<\infty$, $0 \leqq \exists\lambda < 1$, $\forall z \in A$, $|T^n z - p| \leqq K\lambda^n$, p は不動点. 以下これを a.c. とかく) かどうかを調べることである. 文献[2]の[I]にこのための十分条件

及び興味ある実例が示されている．十分条件の一つとしては

$f = \sum_i f(i|j,k)$ は j,k によらない正の constant.

次をみたす constant $c < \frac{1}{2}$ が存在する.

$$\frac{1}{2f}\sum_i |f(i|j_1,k) - f(i|j_2,k)| \leqq c$$

$$\frac{1}{2f}\sum_i |f(i|j,k_1) - f(i|j,k_2)| \leqq c \qquad \forall j, j_1, j_2, k, k_1, k_2$$

ならば T の不動点は unique かつ a.c. である.

3. 収束定理の formulation 及び結果

FWH-model の不動点が unique かつ a.c. である場合の収束定理は [2] の II で示されている. 不動点が unique でない場合には.

<u>定理9 [3]</u> $\quad f(i|j,k) = c\,w_{jk}(\delta(i,j)+\delta(i,k))$

$$0 \leqq w_{jk} = w_{kj} < \infty$$

なる FWH-model において

(i) $W = (w_{jk})$ の任意の principal subdeterminant は 0 でない.

(ii) $c > 0$ $\quad \forall p$: T の不動点に対し $cF(p) \neq 0$.

$$\left(F(p) \equiv \sum_{ij} p(i)\, w_{ij}\, p(j) \right)$$

(iii) $p(i) = 0$ なる不動点 p に対し $Wp(i) \neq F(p)$

(iv) $\sigma^2(i|ii) > 0 \quad \forall i$

(v) $\forall (j,k)$-couple が子供をもたない確率は正.

ならば確率 1 で random set $\Theta \subset \{1, \cdots, d\}$ が存在し

$$i \notin \Theta \Longrightarrow Z_n(i) = 0 \quad \text{eventually} \quad (\text{i.e. 十分大きい } n \text{ に対し})$$

$$i \in \Theta \Longrightarrow Z_n(i) \longrightarrow \infty.$$

また $^{\forall}\Xi \subset \{1, \cdots, d\}$ に対し

$$G_{\Xi} \equiv \{ Z_n(i) \longrightarrow \infty \ \ ^{\forall} i \in \Xi,\ Z_n(i) \longrightarrow 0 \ \ i \notin \Xi \}$$

上で a.e. に $w > 0$ と不動点 $p \in D(\Xi) \equiv \left\{ z \in A : z(i) \begin{cases} = 0 & i \notin \Xi \\ \neq 0 & i \in \Xi \end{cases} \right\}$

が存在し

$$\gamma(p) = c \sum_{l,k} p(l)\, w_{l,k}\, p(k) > 1$$

及び $\displaystyle \lim_{n \to \infty} \frac{Z_n(i)}{(\gamma(p))^n} = w\, p(i) \quad , 1 \le i \le d.$

収束定理はもっと一般なclassに対して証明されている。

$\{Z_n\}_{n \ge 0}$ を以下の条件をみたす $(\mathbb{R}_+)^d$-値確率過程とする.

(A). $^{\exists}\tau : (\mathbb{R}_+)^d \longrightarrow \mathbb{R}_+$, $\quad ^{\exists}T : A \longrightarrow A \quad 0 < {}^{\exists}\delta \le 1/2$

$$|Z_n| \ge K_0 \quad 0 \le \gamma \le K_1 |Z_n|^{\delta}$$

に対し

$$P_n\{ |Z_{n+1} - \tau(Z_n) T \tilde{Z}_n| \ge \gamma |Z_n|^{1-\delta} \} \le K_2 \gamma^{-2}$$

(B) ・T は Lipschitz 連続

・T の不動点は有限個 これを $p_1, \cdots, p_k$ とする.

・$^{\forall} p_j$ に対し T はある閉近傍 U_j 上で連続的微分可能.

(C) $\exists \tau_0 > 0$, $\exists \gamma : A \to [\tau_0, \infty)$, $\exists \beta > 0$ $\exists K_5 < \infty$

- $\tau(Z) \geq \tau_0 |Z|$
- $\left| \dfrac{\tau(Z)}{|Z|} - \gamma(\hat{Z}) \right| \leq K_5 |Z|^{-\beta}$
- $|\gamma(z_1) - \gamma(z_2)| \leq K_5 |z_1 - z_2|^{\beta}$

$^\forall p$: Tの不動点に対して $\varphi : A \to \mathbb{R}^{d-1}$ を

$$\varphi(z) \equiv (z(1) - p(1), \cdots, z(d-1) - p(d-1))$$

とする．微分可能性の仮定により

$$\varphi(Tz) = {}^{\exists}N \varphi(z) + o(|z - p|) \qquad z \to p$$

となる matrix N が存在する．Nの固有値を絶対値の大きい順にならべたものを $\lambda_1, \cdots, \lambda_{d-1}$ とする．

<u>定義</u>　p: strongly stable $\Longleftrightarrow |\lambda_1| < 1$

　　　unstable $\Longleftrightarrow |\lambda_1| > 1$

strongly stable ならば pのある近傍上で Tは almost contraction である．~~∃~~ V を $M = V^{-1} N V$ が

$$\begin{pmatrix} \lambda & & \\ \gamma & \ddots & \\ & \gamma & \lambda \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} \alpha & \beta & & & & & \\ -\beta & \alpha & & & & & \\ \gamma & 0 & \alpha & \beta & & & \\ 0 & \gamma & -\beta & \alpha & & & \\ & & & \ddots & & & \\ & & & & \gamma & 0 & \alpha & \beta \\ & & & & 0 & \gamma & -\beta & \alpha \end{pmatrix}$$

なるかたちの小行列式からなるものとする．γは十分小とする．$\psi \equiv V^{-1} \varphi$ とするとき

(D) $\rho_j = \gamma(p_j) \neq 1.$

$|\lambda_1^{(j)}| \neq 1 \quad {}^\forall p_j$

(E) ${}^\exists F : A \longrightarrow \mathbb{R}_+$ s.t.

・ F は連続

・ $F(Tz) \geq F(z) \quad {}^\forall z \in A.$

等号は z が不動点の場合にのみ成立.

・ ${}^\forall p$: unstable に対し ${}^\exists a, b : B = \psi(A) \longrightarrow \mathbb{R}_+$ s.t.

(i) $a(0) = b(0) = 0$

$\|y\| \to 0$ ならば

$|a(x) - a(x+y)| + |b(x) - b(x+y)| \to 0$

unif. $x \in B$, $x+y \in B$

(ii) $\displaystyle \lim_{\Delta \downarrow 0} \sup_{a(x)+b(x) \leq \Delta} \|x\| = 0$

(iii) $3 \leq {}^\exists K_{19} < \infty$, $0 \leq {}^\exists \Lambda < 1$ 及び $0 < {}^\forall \varepsilon \leq 1$

に対し $\Delta_0(\varepsilon)$ が存在し ${}^\forall \Delta \leq \Delta_0(\varepsilon)$ に対し

・ $a(u) \leq \Delta$, $b(u) \leq \varepsilon\Delta$, $u \in B$

$\Longrightarrow a(S_y^u) \leq K_{19}\Delta$, $b(S_y^u) \leq 2\varepsilon\Delta$

・ $a(u) \leq (K_{19}+\varepsilon)\Delta$, $b(u) \leq 3\varepsilon\Delta$, $b(u) > \varepsilon a(u)$

$u \in B \Longrightarrow a(Su) \leq 2K_{19}^2\Delta$, $b(Su) \leq \Lambda b(u)$

ここで $S = \psi T \psi^{-1}$

更に $\sigma > 0$, $0 < \varepsilon \leq 1$ が存在し $0 < {}^{\forall}\eta < \sigma$ に対し

$$f(\eta) = f(\eta, \sigma, \varepsilon)$$

$$\equiv \inf\{F(z) - F(p) : \eta \leq |z - p| \leq \sigma, \ b(\varphi(z)) \leq \varepsilon\, a(\varphi(z))\}$$

$$> 0$$

(F): unstable な不動点で Aの内点に対しては

${}^{\forall}L > 0$, ${}^{\forall}\eta > 0$, $\exists K(L, \eta) < \infty$, $\delta^*(L, \eta) > 0$.

s.t.

$$P_n\{|Z_n|^{1/2}\alpha(\varphi(\tilde{Z}_{n+1}) - \varphi(T\tilde{Z}_n)) \geq L$$

$$|Z_n|^{1/2}\beta(\varphi(\tilde{Z}_{n+1}) - \varphi(T\tilde{Z}_m)) \leq \eta\}$$

$$\geq \delta^*(L, \eta) \qquad \text{a.e. on } \{|Z_n| \geq K(L, \eta),\ \tilde{Z}_n \in U\}$$

α は絶対値が1より大きい固有値に対応する固有空間への projection, β は1より小さいものに対するもの.

・境界上の unstable な不動点に対しては

上が成立するか, 又は $p(i) = 0$ なる i に対し

$$P_n\{|Z_{n+1}(i) - \tau(Z_n)T\tilde{Z}_n(i)| \geq \gamma Z_n(i)^{1-\delta}\}$$

$$\leq K_2 \gamma^{-2}$$

$$\text{if } Z_n(i) \geq K_0, \ 0 \leq \gamma \leq K_1 Z_n^{\delta}(i)$$

及び $\rho_j \lambda > 1$ なる λ が存在し

$$T\tilde{Z}(i) > \lambda \tilde{Z}(i) \qquad \tilde{Z} \in U$$

定理8°[3] (A) が $\delta = \frac{1}{2}$ に対し成立し (B) ~ (F) がなりたてば．

$$G^* = \{ Z_n(i) \longrightarrow \infty \ \forall i \}$$

上で a.e. に $\rho_j > 1$ なる strongly stable な不動点 p_j と $w > 0$ が存在し

$$\lim_{n \to \infty} \frac{Z_n}{(\rho_j)^n} = w \, p_j$$

又 $\forall p_j$: strongly stable に対し $\rho_j < 1$ ならば $P\{G^*\} = 0$.